



Carol AHNERT IGLESIAS es Doctora en Ciencias Físicas y diplomada en Ingeniería Nuclear. Desarrolla su actividad profesional en el Instituto de Tecnología Nuclear del CIEMAT, siendo responsable del proyecto «métodos analíticos para estudios de seguridad», siendo su especialidad el desarrollo de métodos computacionales avanzados para análisis de núcleos de reactores de fisión y fusión. Ha sido investigadora principal de un proyecto de investigación coordinado por el OIEA; sus trabajos han sido presentados en varias conferencias internacionales, y publicados en revistas de la especialidad de prestigio mundial.



José M. ARAGONES BELTRAN es Doctor Ingeniero Industrial y Catedrático de Física Nuclear en el Departamento de Energía Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid. Es autor de numerosos trabajos de investigación aplicada a los campos de la física de la fusión y la fisión nuclear, y participa con regularidad en las conferencias internacionales sobre estas materias.

NUEVO METODO DE CALCULO DETALLADO DEL NUCLEO, MEDIANTE DIFUSION SINTETICA EN MALLA ANCHA

INTRODUCCION

En el cálculo de reactores, como en otros campos de la física donde el problema del transporte de partículas se reduce a la resolución de unas ecuaciones de difusión en configuraciones espaciales heterogéneas, multidimensionales y de gran tamaño respecto al recorrido libre medio de las partículas, hay un gran incentivo en reducir el número de puntos espaciales y grupos energéticos en la solución discretizada. Para ello hemos desarrollado de forma original (1) una nueva formulación en diferencias finitas lineal y discontinua, que mediante el empleo de malla espacial ancha y pocos grupos energéticos, produce resultados equivalentes a los obtenidos empleando malla fina y multigrupos.

La formulación está basada en el empleo de unos factores de discontinuidad del flujo en las interfases espaciales, que son determinados explícitamente a partir de cálculos detallados de difusión o transporte en malla fina y multigrupos, los cuales tienen en cuenta los efectos de heterogeneidad, malla ancha y espectrales, permitiendo esta formulación la reducción (síntesis) estable y precisa de: direcciones espaciales (transporte a difusión), puntos de malla espaciales (malla fina a malla ancha) y grupos energéticos (varios grupos a un grupo).

Son conservados los flujos medios y por tanto las tasas de reacción, así como los flujos y las corrientes netas en las interfases, mediante una discretización del flujo de forma, lineal dentro de cada nodo y discontinua en las interfases; y corrigiendo los coeficientes de difusión, y el

término de gradiente del flujo en las interfases en la formulación de difusión en diferencias finitas.

Para introducir tal formulación se modifica simplemente el flujo en la interfase entre los nodos J y $J+1$, mediante un factor a determinar, para obtener la corriente neta de interfase a partir del flujo medio del nodo J , a la izquierda de la interfase, según:

$$J_{J,J+1}^g = -D_J^g \frac{f_{J,J+1}^g \cdot \phi_s^g - \phi_J^g}{H_J/2}$$

donde en cada grupo g se tiene:

$J_{J,J+1}^g$ es la corriente neta en la interfase entre los nodos J y $J+1$.

$D_J^g = \sum_i V_i D_i^g \phi_i^g / V_J \phi_J^g$ es el coeficiente de difusión *homogeneizado* del nodo J por simple pesado directo, con el flujo detallado en el interior del nodo, de los coeficientes de difusión heterogéneos.

H_J es la anchura del nodo J .

$f_{J,J+1}^g$ es el *factor de corrección* desde el nodo J del flujo ϕ_s^g en la interfase entre los nodos J y $J+1$.

$\phi_J^g = \frac{1}{V_J} \sum_i V_i \phi_i^g$ es el flujo medio en el nodo J .

De la igualdad entre las corrientes por la derecha y por la izquierda, se obtiene el flujo *real* en la interfase entre los nodos J y $J+1$.

$$\phi_s^g = \frac{H_{J+1} D_J^g \phi_J^g + H_J D_{J+1}^g \phi_{J+1}^g}{H_{J+1} D_J^g f_{J,J+1}^g + H_J D_{J+1}^g f_{J+1,J}^g}$$

y la corriente neta en la interfase en términos de los flujos medios en los nodos contiguos:

$$J_{J,J+1}^g = \frac{2 D_J^g D_{J+1}^g}{H_{J+1} f_{J,J+1}^g + H_J D_{J+1}^g f_{J+1,J}^g} (f_{J+1,J}^g \phi_{J,J+1}^g - f_{J,J+1}^g \phi_{J+1,J}^g)$$

Nótese que para reproducir el flujo de interfase es necesario conocer ambos factores de corrección $f_{J,J+1}^g$ y $f_{J+1,J}^g$, mientras que para determinar la corriente neta sólo es necesario conocer su cociente, dado que:

$$J_{J,J+1}^g = \frac{2 D_J^g D_{J+1}^g}{H_{J+1} D_{J,J+1}^g + H_J D_{J+1,J}^g} (\phi_J^g - r_J^g \phi_{J+1}^g)$$

con:

$$r_J^g = \frac{f_{J,J+1}^g}{f_{J+1,J}^g} = \frac{\phi_J^g}{\phi_{J+1}^g} \frac{H_J}{H_{J+1}} \frac{D_{J,J+1}^g}{D_{J+1,J}^g}$$

Con esta formulación generalizada de diferencias finitas para las corrientes netas, se obtienen las siguientes ecuaciones de difusión en cada nodo J y grupo g:

$$-\alpha_{J-1}^g \phi_{J-1}^g + (\beta_{J-1}^g + \alpha_J^g) \phi_J^g - r_J^g \alpha_J^g \phi_{J+1}^g = S_J^g$$

donde los coeficientes vienen dados por:

$$\alpha_J^g = \frac{2 D_J^g D_{J+1}^g}{H_{J+1} D_{J,J+1}^g + H_J D_{J+1,J}^g} A_{J+1}$$

$$\beta_J^g = V_J \sum_{g'} \alpha_{J,J}^{g'} + \sum_{g' \neq g} \sum_{g''} \alpha_{J,J}^{g'-g''}$$

y los términos de fuente en cada nodo y grupo.

$$S_J^g = \chi_J^g \frac{V_J}{K_{eff}} \sum_{g'} \alpha_{J,J}^{g'} \phi_J^{g'} + V_J \sum_{g' \neq g} \sum_{g''} \alpha_{J,J}^{g'-g''} \phi_J^{g''}$$

La determinación de los *factores de discontinuidad* en las interfases se puede realizar mediante cálculos espaciales locales de fácil convergencia, por ser problemas con radio espectral reducido. Por otra parte, la estabilidad de la solución exige que los factores de corrección r^g sean finitos y positivos, lo que requiere el cumplimiento de la condición.

$$J_{J,J+1}^g \leq \frac{D_J^g}{H_J/2} \phi_{J'}^g ; J' = \{ J, J+1 \}$$

En la práctica, de la experiencia numérica se obtiene que esta condición se cumple siempre con creces, incluso para nodos de anchura igual a la de los elementos (unos 20 cm), y, por tanto, $r^g \approx 1$, con lo que la estabilidad de la solución queda asegurada.

La formulación desarrollada ha sido generalizada (2) y aplicada a la resolución de diversos problemas. Así se han establecido unos nuevos procedimientos de cálculo de núcleo mediante: el método

de malla ancha denominado *local-global*, y un método *nodal avanzado*, que van a ser descritos a continuación, junto con otro desarrollo derivado de esta formulación, que ha sido su aplicación a la aceleración de la convergencia en la resolución de problemas de difusión en multigrupos, y que se trata de un procedimiento de *aceleración sintética*.

ACELERACION SINTETICA

Este es un procedimiento de aceleración de la convergencia de la ecuación de difusión en multigrupos mediante resoluciones alternadas del problema en multigrupos y del problema equivalente reducido a un grupo magnético.

Así dentro de la investigación previa al desarrollo del método de malla ancha, se ha encontrado un procedimiento original de aceleración del proceso iterativo de cálculos de difusión por diferencias finitas, y que está basado en la utilización de los factores de discontinuidad (r), consistiendo fundamentalmente en la resolución de la ecuación de difusión en un grupo energético, corregida mediante los factores de discontinuidad calculados analíticamente para un grupo energético en algunas de las iteraciones, conservando en otras iteraciones la resolución de la ecuación en multigrupos.

Siendo estos factores los siguientes:

$$r_{i,i+1}^1 = \frac{f_{i,i+1}^1 D_{i+1}^{-1} \sum_g D_i^g f_{i,i+1}^g \phi_{i,i+1}^g}{f_{i+1,i}^1 D_i^{-1} \sum_g |D_{i+1}^g f_{i+1,i}^g \phi_{i,i+1}^g|}$$

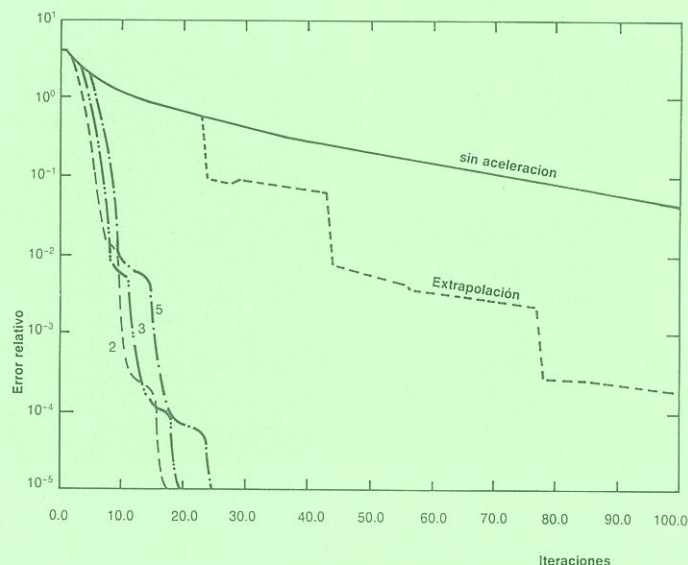
A este tipo de aceleración desarrollada originalmente la denominaremos la *aceleración sintética*. En la Figura 1 se representa el error relativo a la convergencia frente al número de iteraciones utilizadas, para varios casos o procesos iterativos; estos son: sin ningún tipo de aceleración, con la aceleración clásica de extrapolación asintótica de la fuente, (la cual es más eficaz que la aceleración de Chebyshev para acelerar problemas unidimensionales), y tres casos con *aceleración sintética*; estos tres últimos se diferencian entre sí por la frecuencia de las iteraciones realizadas en un grupo energético respecto a las de dos grupos.

Se debe destacar aquí, cómo el hecho de emplear la aceleración sintética reduce drásticamente el número de iteraciones totales necesarias para alcanzar la convergencia. Cuando mediante el uso de la extrapolación asintótica se necesitan 100 iteraciones, con la aceleración sintética se precisan solamente de 15 a 20 iteraciones. Esto supone una reducción en el tiempo de resolución de cualquier proceso iterativo de al menos un factor 5; siendo aplicable no sólo a la resolución de la ecuación de difusión neutrónica, sino también a la de otras ecuaciones análogas.

METODO «LOCAL-GLOBAL» DE CALCULO DE NUCLEO

El método *local-global* de cálculo de núcleo, desarrollado de forma original por

F1 Efecto de la aceleración sintética en 1 grupo.



los autores, está basado en la resolución del problema bidimensional y pocos grupos energéticos mediante iteraciones, del cálculo del núcleo reducido a malla ancha, y cálculos locales de elemento combustible en malla fina.

El procedimiento desarrollado fue ya presentado en la pasada reunión de la SNE, siguiendo el esquema de la Figura II, presentando en esta ponencia los siguientes logros:

- Su validación sistemática para cálculo de núcleo mediante determinación de los parámetros: concentración crítica de boro en función del quemado, valor del boro, valor del banco de control, coeficiente isotermo de temperatura y potencia máxima por barra; encontrándose unas diferencias entre los valores calculados y los medidos, siempre muy aceptables, y por supuesto dentro de los establecidos por los criterios de diseño (Tabla I).
- Su integración en el sistema de cálculo de PWR, denominado SEANAP-86 (3), para determinación de la distribución de potencia local por barra combustible, y de los factores de entrada al simulador nodal de cálculo de núcleo (albedos, factores de transporte y de discontinuidad) (Fig. III) mediante el código de cálculo COBAYA.

MODELO NODAL DE CALCULO DE NUCLEO

También basado en esta formulación, ya fue desarrollado (4, 5) un método de cálculo del núcleo mediante el cual el problema es reducido a malla ancha y un grupo energético, empleando un núcleo de transporte que incluye los factores de discontinuidad del flujo.

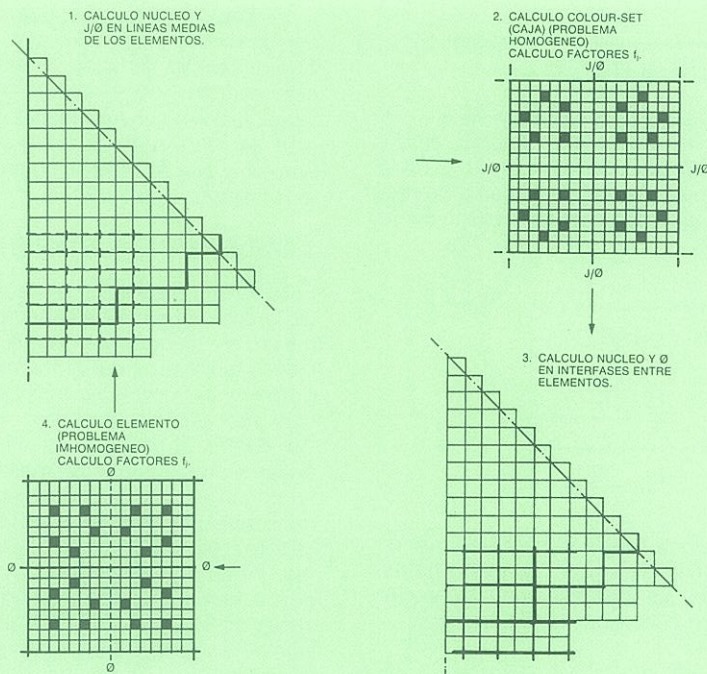
$$W_m = \frac{1}{1 + \frac{f_l}{f_m} \frac{M_l^2}{M_m^2}} \cdot \frac{M_l^2}{K_{\text{cof}} \cdot H^2}$$

donde, M_l^2 y M_m^2 son las áreas de migración de los nodos l y m .

H es la longitud del nodo en la dirección considerada (horizontal o vertical).

f y f_m son los factores de transporte de los nodos l y m , que deben ser determinados previamente y suministrados como datos de entrada al código. Su cociente es el llamado *factor de discontinuidad o heterogeneidad* que también es utilizado en el método de malla ancha pero en dos grupos energéticos.

Habiéndose desarrollado un procedimiento de determinación analítica de los factores de transporte y albedos, y encontrándose publicados ya resultados sobre la aplicación de este método (4, 5) al cálculo de núcleo de PWR.



F II Iteraciones cálculo local-global.

T I				
DATO	Diferencia (COBAYA-MEDIDO) UN.I/UN.II	Criterio		
		Diseño	Aceptación	
Concentración crítica de Boro (ppm)				
ARO	0.0/-8.5	+50.	+100.	
D	-1./+4.			
D + C	-8./0.			
D + C + B	-19./-6.			
D + C + B + A	-29./-17.			
ARI - H14	-5./+6.			
Valor Boro (pcm/ppm)				
	-1.7%/-0.8%	+10.%		
Valor Banco Control (pcm)				
D	0.0 % /+12.1 %	+10. %	+30. %	
C(Din)	+3.1 % /0.0 %			
B(D + Cin)	+3.8 % /+1.4 %			
A(D + C + B)	+1.5 % /-3.1 %			
ARI - H14	+0.4 %/ -0.3 %			
Coeficiente isorterno de temperatura (pcm/F)				
ARO	-1.19/-1.11	+9.72		
D	/-1.32			
D + C	-1.89/			
D - C + B	/-1.11			
D + C + B + A	-0.81/			
Potencia máxima por barrita				
F ^N (%)		+10. %	+15. %	
ARO	+1.12 % /+1.12 %			
D	+2.71 % /+2.35 %			
D + C	+2.99 %			

CONCLUSIONES

Así las tres aplicaciones anteriormente mencionadas han sido por tanto realizadas mediante el uso de programas de cálculo por computador desarrollados empleando la nueva formulación, y se ha demostrado la rapidez de la convergencia y la precisión y estabilidad de la solución, observándose que los valores de los factores de discontinuidad tienen el comportamiento regular esperado.

Las características y el potencial que encierra esta formulación que es también atractiva para otros campos de la física, hacen que nuestro trabajo futuro en el desarrollo de métodos de cálculo de reactores, se oriente a las siguientes aplicaciones del método local-global:

- Resolución del problema de difusión detallado y tridimensional en pocos grupos energéticos.
- Cálculo del quemado detallado del núcleo, con realimentación local (a nivel de barra combustible) de las heterogeneidades operacionales. Esta aplicación se encuentra ya iniciada y parcialmente realizada.
- Introducción de la aceleración sintética en las aplicaciones anteriores para reducir en 1/5 su tiempo de cálculo.

Así se puede destacar que los tiempos de cálculo estimados para un ciclo de quemado del núcleo de un PWR de 900 Mwe, mediante el método local-global con detalle de barra combustible y en dos dimensiones espaciales, pueden estimarse en 10'-20' CPU para CYBER 170/835 o UNIVAC 1100/80, y de 1' -2' para IBM-3090/150; si además se tiene en cuenta la reducida memoria que es necesaria para almacenar la información precisada (100 K palabras, incluyendo la ocupada por el propio código de cálculo); puede decirse que nos encontramos ante un sistema de cálculo de núcleo altamente optimizado.

En particular, el método de cálculo desarrollado es especialmente atractivo para su adaptación a computadores vectoriales o con procesadores en paralelo, pensando que también podría ser posible su adaptación a computadores personales (PC).

Debiendo citar que en la última edición del curso monográfico del MIT sobre métodos nodales avanzados, es ya incluido el método aquí presentado como un método de referencia (6).

REFERENCIAS

1. C. AHNERT: «Desarrollo y validación de métodos de cálculo de núcleos heterogéneos de reactores de agua ligero». Tesis, 1986.
2. J. M. ARAGONES y C. AHNERT: «A linear discontinuous finite difference formulation for synthetic coarse-mesh

few-group diffusion calculations». *Nuclear Science and Engineering*, 94, 309 (1986).

3. C. AHNERT, A. CRESPO, J. M. ARAGONES «Validación del sistema de cálculo de núcleo de PWR». S. N. E., XII Reunión Anual (1986).
4. J. M. ARAGONES y C. AHNERT: *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 47, 414 (1984) y 50, 281 (1985).

5. C. AHNERT y J. M. ARAGONES: «Fuel Management and Core Design Code System for PWR Neutronic Calculations». *Nuclear Technology*, 69, 350 (1985).

6. A. F. HENRY, K. S. SMITH: «Modern Nodal Methods for Analyzing light Water Reactors». Curso monográfico del Massachusetts Institute of Technology, 1986.

F III Modelo de cálculo del sistema SEANAP-86.

